

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

PABLO BONIOL OLIVEIRA

**DETERMINAÇÃO GEOESTATÍSTICA DO ÍNDICE DE
SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL**

CAMPO MOURÃO

2018

PABLO BONIOL OLIVEIRA

DETERMINAÇÃO GEOESTATÍSTICA DO ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II (TCC II), do curso de Engenharia Ambiental, do Departamento Acadêmico de Ambiental (DAAMB) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Hilário Delconte Ferreira

Co-orientador: Prof. Dr. Eudes José Arantes

CAMPO MOURÃO

2018

À minha mãe,
pelo exemplo de determinação, força, coragem
e imenso amor por mim.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Campo Mourão
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Ambiental - DAAMB
Curso de Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

DETERMINAÇÃO GEOESTATÍSTICA DO ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL

por

PABLO BONIOL OLIVEIRA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 25 de Junho de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a banca examinadora considerou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. JOSÉ HILÁRIO DELCONTE FERREIRA

Prof. Dr. EUDES JOSÉ ARANTES

Prof. Dr. EDVANDO VITOR DO COUTO

Prof. Dr. MARCELO GALEAZZI CAXAMBU

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na coordenação do curso de Engenharia Ambiental.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me concedeu a vida, o conhecimento, a determinação e a força para enfrentar todos os obstáculos e as fraquezas que nesta vida eu vivi e viverei.

A minha mãe, pela dedicação, determinação, paciência e amor, pois é por ela que dedico meus esforços e é a quem me espelho todos os dias.

Ao meu pai, irmãos e familiares, por acreditarem em mim e me fazer acreditar que é possível realizar sonhos, mas que é preciso persistir.

Aos meus amigos que proporcionaram a melhor época da minha vida e que com toda certeza levarei e caminharei para o resto dela, em especial, obrigado Brendon, Caio, Eduardo, Gabriel, Gustavo, Ícaro, João Vitor, Luis Guilherme, Mayara, Murilo e Pauline.

Em especial, ao meu orientador, Prof. Dr. José Hilário Delconte Ferreira, Prof. Dr. Edivando Vitor do Couto e co-orientador, Prof. Dr. Eudes José Arantes, pelos ensinamentos transmitidos, pela orientação, e, principalmente, pela paciência e confiança em mim depositados, meu sincero obrigado.

E a todos os professores que tive durante toda graduação, dedicaram-se um pouco do seu tempo para compartilharem seus ensinamentos e contribuírem tanto em minha formação profissional como pessoal.

“You only live once.”

(The strokes)

RESUMO

Por conta do excessivo crescimento econômico, os recursos naturais estão sendo altamente degradados. Diante disso, visando atingir o desenvolvimento sustentável, são construídos diversos índices e indicadores para determinar o nível de sustentabilidade ambiental. Portanto, o presente estudo teve como objetivo determinar o índice de sustentabilidade ambiental de bacias hidrográficas por intermédio de análise geoestatística através da ferramenta de geoprocessamento e sensoriamento remoto. A área de aplicação, escolhida para determinar o índice de sustentabilidade ambiental foi a bacia hidrográfica do rio Goioerê e para isso foram definidos três fatores: o fator que caracteriza o uso e ocupação da terra (fator uso do solo), a situação morfométrica do terreno (fator fragilidade potencial) e as condições socioeconômicas da população (fator de desenvolvimento humano), fatores estes que são recomendados pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (ODCE) que refletem o modelo de avaliação Pressão – Estado – Impacto. O resultado obtido através do índice de sustentabilidade ambiental foi expresso na forma numérica variam entre zero e um, no qual, quanto mais próximo de um for o valor obtido, maior é a sustentabilidade ambiental. Ao analisar a bacia hidrográfica do rio Goioerê, no fator de uso do solo, constatou que cerca de 80,72% da bacia apresentavam áreas agrícolas. Em relação ao fator fragilidade a bacia apresentou mais de 90% de baixos índices de rugosidade, o que reflete em um bom índice de fragilidade potencial, evidenciando baixo potencial erosivo ao longo da bacia. Já para o fator de desenvolvimento humano, que constituiu dados de educação, saneamento, longevidade e renda, cerca de 97,47% da bacia está na faixa de baixo e muito baixo desenvolvimento humano quando analisadas com as cinco faixas recomendado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (2013). O cruzamento deste três fatores resultou no índice de sustentabilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Goioerê, apontando que aproximadamente 87% desta, possui um alto índice de sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Índices. Sustentabilidade. Bacias hidrográficas. Geoprocessamento.

ABSTRACT

Due to excessive economic growth, natural resources are being highly degraded. Therefore, in order to achieve sustainable development, various indices and indicators are constructed to determine the level of environmental sustainability. Therefore, the present study aimed to determine the environmental sustainability index of watersheds through geostatistical analysis through geoprocessing and remote sensing tools. The application area chosen to determine the environmental sustainability index was the Goioerê river basin and for this purpose three factors were defined: the factor that characterizes land use and occupation (land use factor), the morphometric condition of the land (factor of potential fragility) and the socioeconomic conditions of the population (human development factor), which are recommended by the Organization for Economic Cooperation and Development (ODCE), which reflect the Pressure - State - Impact assessment model. The result obtained through the environmental sustainability index was expressed in numerical form ranging from zero to one, in which, the closer to the value obtained, the greater the environmental sustainability. When analyzing the watershed of the river Goioerê, in the land use factor, it was verified that about 80.72% of the basin presented agricultural areas. Regarding the fragility factor, the basin presented more than 90% of low roughness indexes, which reflects a good index of potential fragility, evidencing low erosive potential along the basin. As for the human development factor, which constituted data on education, sanitation, longevity and income, about 97.47% of the basin is in the low range and very low human development when analyzed with the five ranges recommended by the United Nations Program for Development (2013). The crossing of this three factors resulted in the environmental sustainability index of the Goioerê river basin, pointing out that approximately 87% of this river has a high environmental sustainability index.

Key-words: Indexes. Sustainability. Watersheds. Geoprocessing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Goioerê, Paraná, Brasil.....16**
- Figura 2 - Classes de uso da terra da bacia hidrográfica do rio Goioerê. Erro!**
Indicador não definido.
- Figura 3 - Nível de fragilidade potencial da bacia hidrográfica do rio Goioerê. .27**
- Figura 4 - Nível de fator de desenvolvimento humano da bacia hidrográfica do rio Goioerê.....28**
- Figura 5 - Nível de sustentabilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Goioerê.....29**
- Figura 6 - Recortes dos dados obtidos. A) Resultado do fator do uso do solo. B) Resultado do fator fragiliadade potencial. C) Resultado do fator de desenvolvimento humano. D) Resultado do índice de sustentabilidade ambiental (Quadrante A – veja a localização na Figura 5).Erro! Indicador não definido.**
- Figura 7 - Recortes dos dados obtidos. A) Resultado do fator do uso do solo. B) Resultado do fator fragiliadade potencial. C) Resultado do fator de desenvolvimento humano. D) Resultado do índice de sustentabilidade ambiental (Quadrante B – veja a localização na Figura 5).Erro! Indicador não definido.**

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
3 MATERIAL E METODOS	16
3.1 Área de estudo	16
3.2 Banco de dados	16
3.3 Índice de Sustentabilidade Ambiental	18
3.3.1 Cálculo do Fator de Uso do Solo.....	19
3.3.2 Cálculo do Fator de Fragilidade Potencial	19
3.3.3. Cálculo do Fator de Desenvolvimento Humano	21
4 RESULTADOS	25
4.1. Fator de Uso do Solo	25
4.2. Fator Fragilidade Potencial.....	26
4.3. Fator de Desenvolvimento Humano	27
4.4. Índice de Sustentabilidade Ambiental	28
5. DISCUSSÃO	30
6 CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS	39
APÊNDICE A – ALGORITMO DO ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL.	

1 INTRODUÇÃO

Os conceitos de desenvolvimento sustentável surgiram das críticas ao crescimento econômico excessivo (LARA e OLIVEIRA, 2017), os principais conceitos derivaram de acontecimentos históricos em um contexto de uma consciência crescente de uma iminente crise ecológica, em eventos como o relatório do Clube de Roma, de 1972, a Conferência sobre o Homem e o Meio Ambiente, ou Conferência de Estocolmo, também de 1972, o Relatório Brundtland, intitulado “ Our Common Future”, de 1987, e a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, ou RIO-92, de 1992, e a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Natural, ou Rio+20, de 2012 (DU PISANI, 2006; HÁK; JANOŠKOVÁ; MOLDAN, 2016).

Apenas em setembro de 2001, nos Objetivos do Desenvolvimento do Milênio (ODM) apresentados no documento “Road Map towards the implementation of the United Nations Millennium Declaration” em que a sétima meta da ODM se refere ao termo sustentabilidade ambiental, apresentando como alvos: integrar os princípios do desenvolvimento sustentável nas políticas e programas do país e reverter à perda de recursos ambientais, reduzir pela metade até 2015 a proporção de pessoas sem acesso sustentável a água potável, e por fim, até 2020 ter alcançado uma melhora significativa na vida de pelo menos 100 milhões de moradores comunidades periféricas (UNITED NATIONS, 2001).

Para avaliar a sustentabilidade ambiental de uma região em questão é necessário um conjunto de informações que integrem: aspectos econômicos, sociais e ambientais (ÖDZERMIR, et al. 2011), estas informações são interdisciplinares e de difícil interpretação para um público não especialista, e é nesta circunstância que os indicadores e índices surgem como ferramentas capazes de simplificar a complexibilidade dos dados de forma a fornecer orientação para aqueles que planejam intervenções para ajudar a tornar o desenvolvimento sustentável uma realidade e expressar dados complexos em uma configuração simplificada (BRAGA, et al., 2004; TURNHOUT, et al., 2007).

O desenvolvimento e uso de indicadores de sustentabilidade tem sido considerada uma área de pesquisa ativa e prática e que possuem diversas aplicações interativas, já que estes possuem como objetivo atribuir um valor ou um número que descreve a complexibilidade entre a saúde social, ambiental e ecológica (TODOROV

e MARINOVA, 2011), exercendo assim uma função fundamental na geração de dados para avaliação de sustentabilidade ambiental e os impactos das questões ambientais para construção de planejamento, estratégias e decisões políticas afim de alcançar a sustentabilidade (KEMERICH, et al., 2013; DIZDAROGLU, 2017).

Os índices de sustentabilidade são compostos por indicadores e que proporcionam informações compactas e objetivas para gerenciar e desenvolver políticas de tal forma que seu resultado possa ser amplamente entendido e aplicado afim de ajudar organizações públicas e privadas a alcançarem um nível de sustentabilidade ambiental adequado (VIEIRA e STUDART, 2009; SILVA e LIMA, 2017).

Portanto, ponderar e agregar indicadores de sustentabilidade relevantes, para qualquer tipo de estudo, são etapas criticamente importantes em qualquer avaliação de índices sustentabilidade (GAN, et al., 2017). No entanto, à medida que o desejo do público por mais sustentabilidade se fortalece (KATES et al., 2001), a necessidade de avaliar com precisão a sustentabilidade de nossas sociedades passa a ser um desafio do nosso tempo (BÖHRINGER e JOCHEM, 2007; SACHS, 2015).

A aplicação e a construção de índices de sustentabilidades são consideradas tão eficientes que pesquisadores propõem estas diretrizes em diversos contextos como: sustentabilidade urbana conforme o estudo realizado por Childers, et al. (2015), sustentabilidade industrial aplicado por Leigh e Li (2015) e sustentabilidade energética por Franzitta, Curto e Rao (2016).

Embora existam diversos índices ambientais para bacias hidrográficas há poucos estudos específicos, que visem mensurar o nível sustentabilidade e que abrangem diferentes questões e respostas socioeconômicas e ambientais objetivando identificar possíveis locais que precisam alcançar a sustentabilidade, sendo capaz de auxiliar no planejamento dos recursos hídricos (CHAVES e ALIPAZ, 2007). Apesar de bacias hidrográficas serem unidades naturais de planejamento para recursos hídricos, as bacias não são tidas, na prática, como objetos para governança política afim de manejar esses recursos (NEYRGES, 2002), isto se dá principalmente por ultrapassarem os limites territoriais político-administrativos.

E para auxiliar neste planejamento dos recursos hídricos e na construção de índices e indicadores de sustentabilidade ambiental o geoprocessamento e o sensoriamento remoto são considerados importantes ferramentas para elaboração e execução de destes índices, afim de diagnosticar estudos ambientais prévios das

condições de sustentabilidade de bacias hidrográficas, por serem capazes de unir diversos dados e possuírem uma maior facilidade em demonstrarem os processos naturais e antrópicos que ocorrem nestas áreas (PETERSON, 2009; LONGLEY, et al., 2012; SCOTT e JANIKAS, 2009).

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um índice de sustentabilidade ambiental de bacias hidrográficas por análise geoestatística desenvolvido em Sistema de Informação Geográfica (SIG), executado através de técnicas e ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto, compondo-se por três fatores, sendo eles, o fator uso do solo, fator fragilidade potencial e o fator de desenvolvimento humano e identificar os níveis de sustentabilidade de uma bacia hidrográfica no sul do Brasil.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Em 1980, o termo desenvolvimento sustentável emergiu da relação entre preservação do planeta e atendimento das necessidades humanas (INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE AND NATURAL RESOURCES, 1980). Em 1987, o Relatório Brundtland (WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT, 1987) simplifica o conceito de desenvolvimento sustentável, sendo o desenvolvimento que “satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras satisfazerem as suas próprias necessidades”.

Porem apenas em 2001, nos Objetivos do Desenvolvimento do Milênio (ODM) apresentados no documento “Road Map towards the implementation of the United Nations Millennium Declaration” (UNITED NATIONS, 2001), na sétima meta da ODM, à sustentabilidade ambiental é citada, afim de definir metas para gestão e planejamento a fim de atingir um desenvolvimento sustentável.

Apesar de existir o consenso sobre a importância do desenvolvimento sustentável para garantir condições dignas de existência à presentes e futuras gerações, os recursos naturais ainda são explorados insustentavelmente, e destaca que o processo de degradação dos corpos hídricos é um dos mais intensos dos diversos recursos naturais existentes; degradação esta, provocada pelo processo de urbanização (OLIVEIRA e REIS, 2017).

Visto que existem problemas na conservação dos recursos hídricos e que sua existência é fundamental para a qualidade de vida do ser humano e para o meio ambiente, é essencial conservar as bacias hidrográficas já que de acordo com a Política Nacional do Recursos Hídricos a Lei Federal nº 9.433/97, esta deve ser considerada “a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos” como unidade básica de gestão e planejamento.

Para monitorar e avaliar a sustentabilidade, é preciso elaborar mecanismos como indicadores e índices ambientais qualificados que mensurem, propõem e auxiliem em boas práticas para o desenvolvimento de um sistema sustentável (SILVA et al., 2017). Portanto, índices e indicadores dão suporte à tomada de decisões em políticas públicas (RAUBER, et al., 2017) exercendo uma função fundamental na

geração de dados para a avaliação de sustentabilidade para um planejamento do desenvolvimento sustentável (KEMERICH et al. 2013).

O geoprocessamento vem como uma importante ferramenta para executar análises e diagnosticar estudos ambientais prévios das condições de sustentabilidade das bacias hidrográficas e devido sua potencialidade de unir diversos dados há uma facilidade maior em compreender os processos naturais e antrópicos que ocorrem nestas áreas (COUTO, 2007; RIBEIRO; LIMA, 2014).

Em vista disto, índice de sustentabilidade para bacias hidrográficas é especialmente útil para avaliar a evolução da bacia hidrográfica de modo a visualizar mudanças rápidas devido ao crescimento demográfico ou desenvolvimento industrial e até mesmo fazer comparações entre várias bacias em uma única região (MAYNARD; CRUZ; GOMES, 2017).

3 MATERIAL E METODOS

3.1 Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Goioerê é a escala geográfica de interesse deste estudo, e dispõe-se de uma área de aproximadamente 3036 km², abrigando um dos maiores polos do agronegócio da América Latina, que correspondeu cerca de 3,5% do valor bruto nominal da produção agropecuária do estado do Paraná em 2016 (INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL, 2017), o rio Goioerê constitui um dos tributários do rio Piquiri, que compõe a bacia hidrográfica do rio Paraná, segunda maior bacia hidrográfica do Brasil (Figura 1).

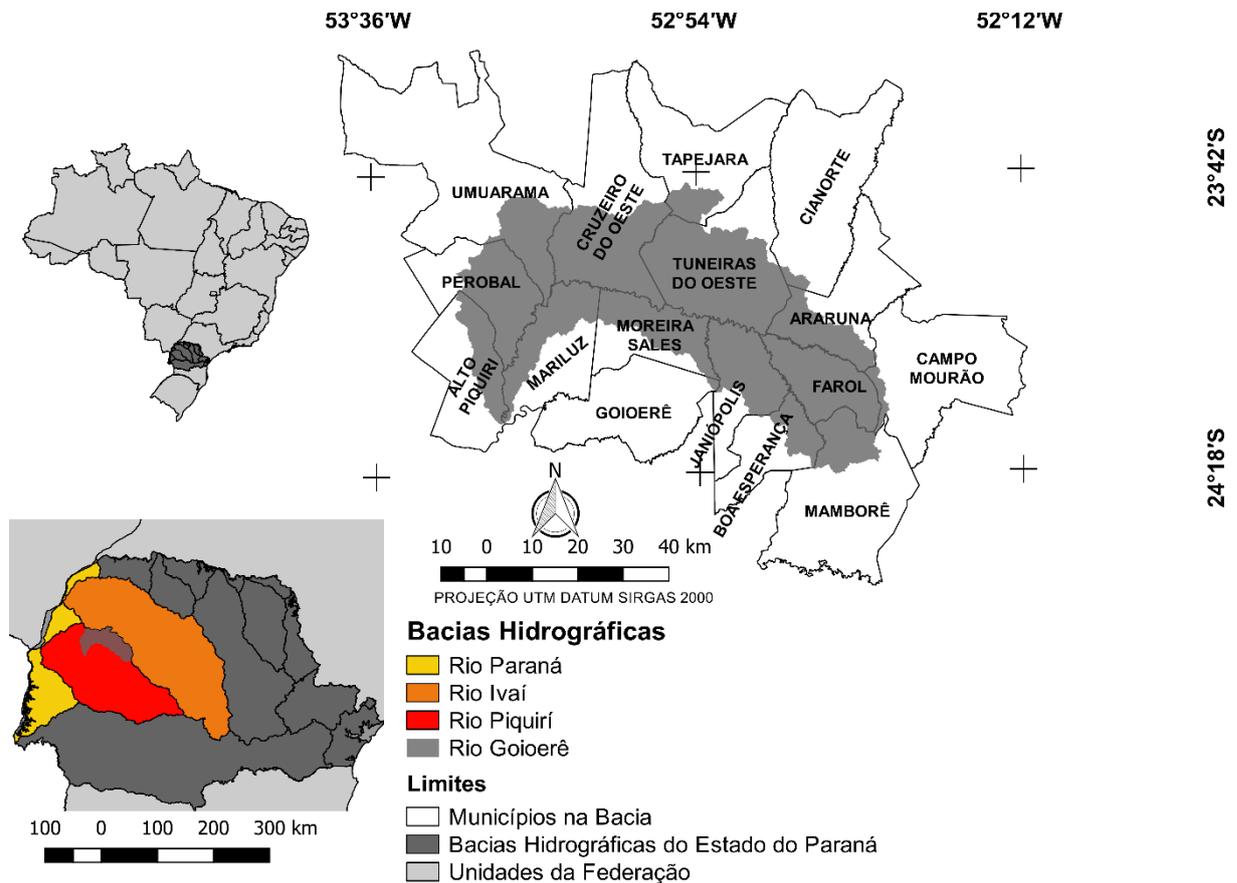


Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Goioerê, Paraná, Brasil.
 Fonte: Autoria própria.

3.2 Banco de dados

Para elaboração do mapa de uso da terra foram utilizadas imagens de satélite utilizadas foram advindas do satélite Sentinel-2, sensor MSI, com resolução espacial

de 10 metros, datada de 20 de julho de 2017, disponibilizadas pela European Space Agency (ESA), sendo as bandas do espectro óptico e seus respectivos comprimentos de onda centro (nm) utilizados neste estudo foram a Banda 2 (490), Banda 3 (560), Banda 4 (665) e Banda 8 (842), para identificar o uso da terra que compõe a área da bacia hidrográfica, esta composição colorida das imagens seguiu-se o sistema RGB, pois se fundamenta na visão humana, que é mais sensível aos comprimentos de onda das radiações eletromagnéticas na região do vermelho, verde e azul (MIRANDA et al. 2016).

O processamento digital das imagens foi realizado por intermédio do SPRING (CÂMARA, et al., 1996), no qual realizou-se a segmentação da imagem, utilizando o método de crescimento de regiões, no qual aplicou-se o valor de 400 para a limiar de similaridade e valor de 10 para a limiar de área; a classificação das imagens foram realizadas através da fotointerpretação para efetuar as amostragens das classes, sendo executados posteriormente utilizando o algoritmo de classificação supervisionada semiautomática através do método de Bhattacharya.

Para a setorização da bacia hidrográfica e das unidades fisiográficas, foi utilizado o *TerraView Hidro* versão 4.2.2 fornecido gratuitamente pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2006a), sendo posteriormente executados no Sistema De Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING) (CÂMARA, et al., 1996).

Os dados de amplitude altimétrica da área da bacia hidrográfica foram obtidas através dos dados altimétricos advindos do satélite ALOS-PALSAR, disponibilizado pela *Japan Aerospace Exploration Agency* (2007), tendo em vista que através desses dados produziria o modelo numérico de terreno (MNT), para gerar planos de informações como declividade e curvas de nível que serão necessários para calcular o fator de fragilidade potencial que requer dados morfométricos.

Para o desenvolver do mapa de nível de fator de desenvolvimento humano da bacia hidrográfica do rio Goioerê foram obtidos dados de desenvolvimento socioeconômico dos municípios que envolvem a bacia hidrográfica foram do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2011), que disponibiliza dados vetoriais com divisão dos municípios e dos setores censitários e com dados do censo demográfico de 2010, junto com base de dados cartográficos de 2014 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2014), dados estes, fundamentais para a aquisição do índice de sustentabilidade ambiental da bacia.

Um banco de dados no software QGIS 2.18 (EQUIPE DE DESENVOLVIMENTO QGIS, 2016) foi elaborado para auxiliar na composição do índice de sustentabilidade ambiental da bacia do rio Goioerê e para geração de mapas temáticos.

3.3 Índice de Sustentabilidade Ambiental

O índice de sustentabilidade que teve como base para este estudo constituiu-se de uma nova versão baseada nas propostas de Couto (2007), Oliveira e Reis (2017), Silva et al. (2017), Vieira e Studart. (2009), e Pellicer-Martínez e Martínez-Paz (2016), que se adaptam bem a realidade brasileira e foram implementadas em SIG por meio de um algoritmo em Linguagem Espacial para o Geoprocessamento Algébrico (LEGAL). Este índice dispõe de três dimensões: p) o uso e ocupação da terra (fator de uso do solo), pp) a condição física da área (fator de fragilidade potencial) e ppp) a condição de desenvolvimento humano (fator de desenvolvimento humano). Tais fatores refletem os aspectos propostos no modelo de avaliação PE/ER (pressão – estado – impacto / efeito – resposta), recomendado pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE).

Para a composição do índice de sustentabilidade foram atribuídos pesos iguais para as três dimensões, configurando-se assim: o fator de uso do solo corresponde às pressões exercidas pelo modelo de desenvolvimento, o fator de fragilidade potencial corresponde ao estado do meio ambiente, e o fator de desenvolvimento humano corresponde tanto ao impacto do modelo de desenvolvimento adotado pela sociedade, como ao efeito das ações desencadeadas.

Para o cálculo do índice de sustentabilidade (Equação 1) gerou-se um algoritmo utilizando a Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL), que reuniu os dados de Uso da Terra (Equação 2), dados físicos da bacia hidrográfica (Equação 3) e os dados socioeconômicos por setores censitários (Equação 6), em que o resultado deste cálculo constituiu o mapa da sustentabilidade ambiental da bacia hidrográfica.

O índice de sustentabilidade ambiental, foi expresso numericamente, entre zero e um, com a finalidade de indicar que quanto mais próximo de um for seu valor expresso, melhor será a condição de sustentabilidade da bacia.

$$IS = \frac{FUS+FFP+FDH}{3} \quad (1)$$

Onde IS é o índice de sustentabilidade da bacia, sendo $0 \leq IS \leq 1$; FUS é o fator de uso do solo; FFP é o fator de fragilidade potencial; FDH é o fator de desenvolvimento humano.

3.3.1 Cálculo do Fator de Uso do Solo

Para a composição do Fator de Uso do Solo (FUS), executou-se a classificação do uso da terra, que rendeu informações essenciais para o cálculo do índice. A cada tipo de uso da terra identificado atribuiu-se um valor de acordo com os impactos que o mesmo gera no meio ambiente, com base nos pesos atribuídos na metodologia proposta por Couto (2007).

As classes de uso da terra com o respectivo peso necessário para o cálculo foram: áreas agrícolas (0.50), áreas antropizadas não agrícolas (0.250), áreas úmidas (0.875), silvicultura (0.625) e vegetação nativa (1.00). A atribuição destes pesos à estas classes considerou-se o grau de proteção e a susceptibilidade aos processos erosivos sofridos por esses meios. Considerando estas questões, concedeu-se o peso maior para áreas que sofrerem menor interferência antrópica e a distribuição dos pesos menores foram introduzidas. as áreas de ocupação antrópica, pois sua pressão ao meio é mais intensa. Estas atribuições foram inseridas, para assim determinar o FUS (Equação 2).

$$FUS = S \quad (2)$$

Onde S é o peso atribuído a cada classe de uso da terra na bacia, sendo $0 \leq S \leq 1$.

3.3.2 Cálculo do Fator de Fragilidade Potencial

No cálculo deste fator, necessitou-se de dados morfométricos que foram obtidos a partir do resultado do modelo numérico de terreno (MNT), através dos dados altimétricos ALOS-PALSAR (*Japan Aerospace Exploration Agency*, 2007) da área de

estudo que informaram os aspectos físicos da bacia, que contribuíram no resultado do índice de sustentabilidade ambiental.

O cálculo do Fator Fragilidade Potencial (*FFP*), foi efetuado em função do índice de rugosidade (Equação 3, 4 e 5). O índice de rugosidade foi inicialmente proposto por Melton (1957), com o objetivo de expressar aspectos da topografia, e posteriormente o conceito do índice foi otimizado por Strahler (1958), sendo mais tarde aplicado por Christofolletti (1980).

$$FFP = I_r \quad (3)$$

$$I_r = H \times D_d \quad (4)$$

$$D_d = \frac{L_t}{A_{sb}} \quad (5)$$

Onde I_r é o índice de rugosidade da bacia hidrográfica sendo $0 < I_r < 1$; H é a amplitude altimétrica da bacia hidrográfica; D_d é a densidade de drenagem na bacia hidrográfica; A_b é a área da bacia hidrográfica; L_t é o comprimento total dos canais por bacia hidrográfica.

Para a escala geográfica desta pesquisa, foi necessário a setorização da bacia hidrográfica do rio Goioerê em sub-bacias para que obtivesse maior quantidade de resultados do cálculo do índice de rugosidade ao longo da sua extensão. Desse modo, adotou-se uma setorização das sub-bacias através de uma área a partir de 10 mil km², para limitar o tamanho mínimo de cada sub-bacia.

Os relacionamentos entre as vertentes e a densidade de drenagem e interpretou que se a densidade de drenagem aumenta enquanto o valor da amplitude altimétrica permanece constante, a distância média entre a divisória e os canais adjacentes será reduzida, aumentando a declividade da vertente. Se o valor da amplitude altimétrica aumenta enquanto a densidade de drenagem permanece constante, também aumentarão as diferenças altimétricas entre o interflúvio e os canais e a declividade das vertentes, concluindo que os valores extremamente altos do índice de rugosidade ocorrem quando ambos os valores são elevados, isto é, quando as vertentes são íngremes e longas (STRHALER, 1958).

Em virtude disso, no presente estudo, considerou-se a amplitude altimétrica por bacia hidrográfica, que consiste na diferença entre a altitude da sua

desembocadura e o seu ponto mais alto; e a densidade de drenagem, que correlaciona o comprimento total dos canais com a área da bacia hidrográfica.

3.3.3. Cálculo do Fator de Desenvolvimento Humano

O Fator de Desenvolvimento Humano (*FDH*) foi calculado por meio da adaptação do Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (*IDHM*) e informações municipais do Censo Demográfico do ano 2010 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2011; PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO, 2013).

Reproduzindo a proposta de Couto (2007), o *IDHM* foi adaptado de forma a incluir a dimensão saneamento, que envolve o uso de recursos hídricos e a sustentabilidade de uma área, sobretudo considerando a situação socioeconômica das comunidades, sendo composto ainda pelas dimensões de educação, longevidade e renda (Equação 6).

$$FDH = \frac{IDH_E + IDH_S + IDH_L + IDH_R}{4} \quad (6)$$

Onde IDH_E é a dimensão educação; IDH_S é a dimensão saneamento; IDH_L é a dimensão longevidade; IDH_R é a dimensão renda.

O *FDH* possuiu como unidade básica de análise o setor censitário do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, em análise das quatro dimensões propostas e após os cálculos destes, os valores foram atribuídos algoritmicamente aos seus setores, para poder realizar posteriormente o cruzamento dos dados, a fim de encontrar o índice de sustentabilidade ambiental.

As unidades dos setores censitários foram analisadas seguindo as cinco faixas de desenvolvimento humano municipal: muito baixo (menor que 0,499), baixo (entre 0,500 e 0,599), médio (entre 0,600 e 0,699), alto (entre 0,700 e 0,799) e muito alto (maior ou igual a 0,800) recomendado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (2013).

A dimensão educação (IDH_E) referiu-se a taxa de alfabetização da população e o número médio de anos de estudo dos responsáveis pelos domicílios dos municípios (Equação 7), sendo a taxa de alfabetização correspondendo 60% do IDH_E ,

os 40% sendo a quantidade de anos de estudos dos responsáveis pelos domicílios por serem bons indicativos na determinação do número de anos estudados pelos dependentes menores.

$$IDH_E = (TA \times 0,60) + (AE \times 0,40) \quad (7)$$

Onde TA é a taxa de alfabetização, sendo $0 \leq TA \leq 1$; AE é o número médio de anos de estudo, sendo $0 \leq AE \leq 1$.

A dimensão saneamento (IDH_S) definiu-se com as mesmas proporções proposta por Couto (2007) levando em consideração a taxa de abastecimento de água, a taxa de coleta de esgotos e a taxa de moradores por domicílio (Equação 8), sendo a taxa de domicílios abastecidos pela rede pública de água correspondendo a 50% na composição do índice, pela taxa de domicílios com coleta de esgotos correspondendo a 40% na composição do índice e pela média de moradores por domicílio correspondendo a 10% na composição do índice.

$$IDH_S = (TAA \times 0,50) + (TCE \times 0,40) + (TMD \times 0,10) \quad (8)$$

Onde IDH_S é a dimensão saneamento; TAA é a taxa de abastecimento de água, sendo $0 \leq TAA \leq 1$; TCE é a taxa de coleta de esgotos, sendo $0 \leq TCE \leq 1$; TMD é a taxa de moradores por domicílio, sendo $0 \leq TMD \leq 1$.

A dimensão longevidade considera o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (Equação 9) relativo a longevidade e o fator de longevidade.

$$IDH_L = IDHM_L \times FL \quad (9)$$

Onde IDH_L é a dimensão longevidade; $IDHM_L$ é o índice de desenvolvimento humano municipal na dimensão longevidade.

O fator de longevidade considerou o número de habitantes do setor censitário que ultrapassa a esperança de vida ao nascer (EVN) do município em anos, o quanto ultrapassa e em quais setores a população não alcança esse valor, com base nas seguintes considerações: o setor não alcança a EVN estimada para o município, então $FL = 0$; o setor alcança a EVN estimada para o município mas não ultrapassa,

então $FL = 1$ e $IDH_L = IDHM_L$; o setor ultrapassa a EVN estimada para o município, então FL irá majorar o valor do $IDHM_L$. Na bacia hidrográfica a esperança de vida ao nascer (EVN) teve uma média de 74 (± 1.12) $n=16$.

O cálculo do fator de longevidade estabeleceu como base o quanto, em média, o setor censitário que ultrapassa a EVN estimada para o município ao qual pertence (Equação 10 e 11).

$$EVN_+ = \frac{\sum(n^\circ \text{ hab.que ultrapassa } EVN \times idade)}{n^\circ \text{ hab.que ultrapassa } EVN} \quad (10)$$

$$FL = 1 + \frac{(EVN_+) - (EVN)}{EVN} \quad (11)$$

Onde EVN_+ é a média de idade acima da EVN verificada para cada setor do município, de acordo com a EVN estimada para cada município; FL é o percentual que a EVN_+ significa em termos de EVN , ou seja, o percentual a majorar no $IDHM_L$ se o setor superar a EVN estimada para o município.

A dimensão renda considerou a renda per capita dos responsáveis por domicílios particulares permanentes e valores de referência mínimo e máximo, em reais, de acordo com os padrões apresentados pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (2013) (Equação 12).

$$IDH_R = \frac{(\log rdpp) - (\log VR_{Min})}{(\log VR_{Máx}) - (\log VR_{Min})} \quad (12)$$

Onde IDH_R é a dimensão renda; $rdpp$ = renda per capita dos responsáveis por domicílios particulares permanentes; VR_{Min} é o valor de referência mínimo; $VR_{Máx}$ é o valor de referência máximo.

A aplicação do logaritmo presente na formula aproxima os valores de renda *per capita* dos menores e, com isso, reduz a desigualdade de renda existente. Mas esse procedimento considera que, à medida que a renda *per capita* se eleva, o retorno desse acréscimo de renda, em termos de desenvolvimento humano, diminui. (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (2013)).

O valor de referência mínimo presente no cálculo foi de R\$8,00, que corresponde a aproximadamente US\$100 em relação a paridade do poder de compra (PPC), limite adotado para o cálculo do IDH Global, já o valor de referência máximo

corresponde a R\$4.033,00, valor da menor renda *per capita* entre os 10% mais ricos residentes na Unidade de Federação com maior renda média do país, o Distrito Federal, a partir dos rendimentos apurados com base nos Censos Demográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO, 2013).

Ao final do processo de aquisição dos três fatores (*FUS*, *FFP* e *FDH*), elaborou-se um algoritmo utilizando o programa LEGAL para cruzar os dados dos fatores analisados e que teve como resultado o índice de sustentabilidade da bacia hidrográfica do rio Goioerê.

Fundamentando-se neste resultado adquirido pelo algoritmo que corresponde ao índice de sustentabilidade, as áreas que possuem baixos valores de sustentabilidade poderão ser identificadas, podendo assim, serem alvo para o planejamento e gerenciamento para atingir a sustentabilidade ambiental (Apêndice A).

4 RESULTADOS

4.1. Fator de Uso do Solo

A utilização do sensoriamento remoto possibilitou a classificação do uso e ocupação da terra na bacia hidrográfica do rio Goioerê, sendo classificado cinco classes de uso e ocupação da terra, sendo elas: áreas agrícolas correspondendo 80,72%, áreas antropizadas não agrícolas 1,40%, áreas úmidas 0,93%, silvicultura 0,35% e a vegetação nativa representando 16,60% da área total da bacia. (Figura 2).

A predominância de áreas agrícolas na bacia hidrográfica do rio Goioerê, pode ser explicada pela exploração dos recursos naturais aliados ao aumento da infraestrutura em áreas urbanas, como relata Trevisan e Moschini (2015), sendo essas ações as principais causas do desmatamento das florestas, o que justifica a menor distribuição da vegetação nativa em sua extensão.

A ausência da vegetação nativa em grande parte na bacia hidrográfica, representa áreas críticas, pois conforme Huang et al. (2013), as florestas possuem um papel importante de controle e regulação da qualidade da água, e Dechen et al. (2015) complementa que, além disso, diminuem o processo de erosão e lixiviação do solo para os cursos d'água.

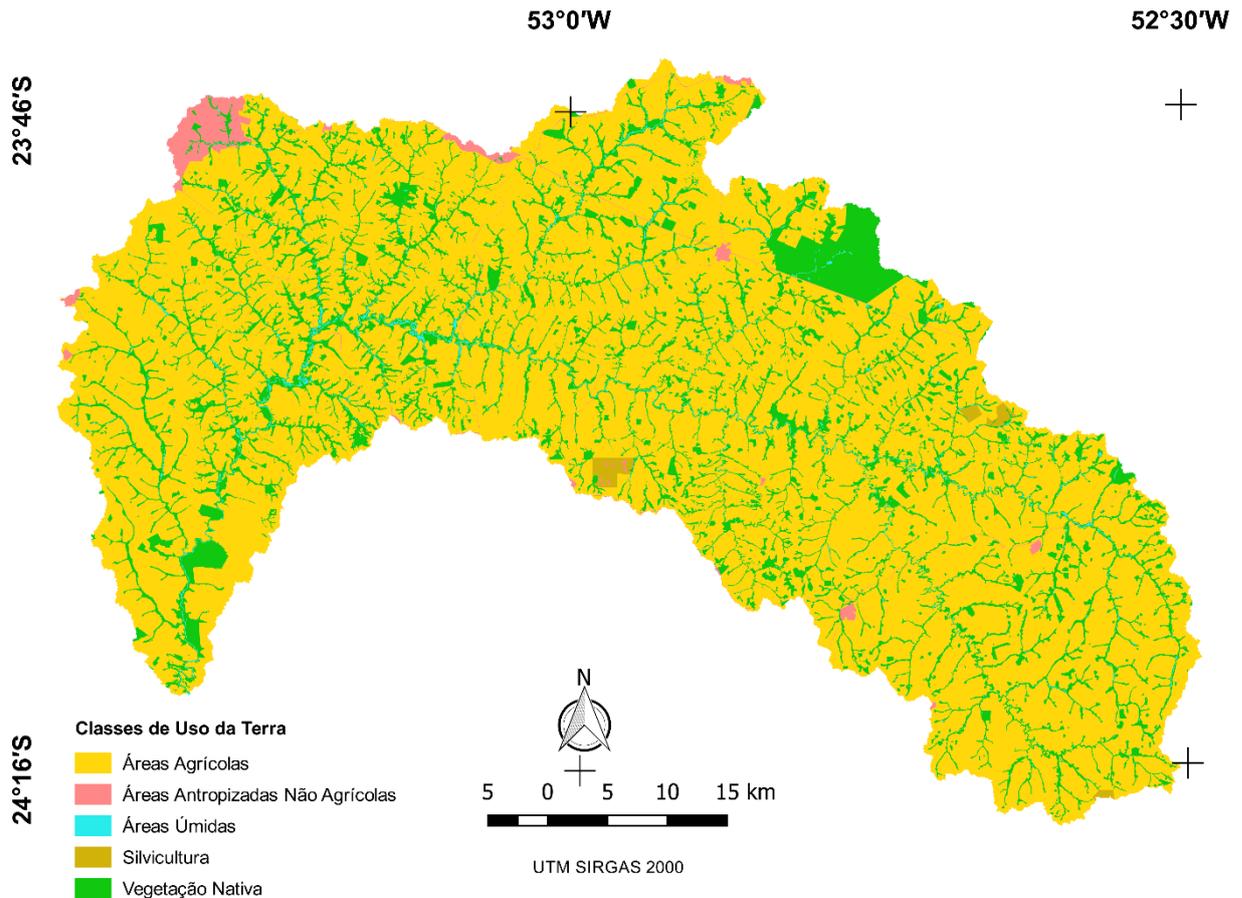


Figura 2 - Classes de uso da terra da bacia hidrográfica do rio Goioerê.
Fonte: Autoria própria.

4.2. Fator Fragilidade Potencial

O cálculo do fator fragilidade potencial foi processado com base nos dados morfométricos presente na bacia hidrográfica, utilizando as áreas das sub-bacias, comprimento dos canais e a amplitude altimétrica para calcular o índice de rugosidade

Os resultados dos cálculos do fator fragilidade potencial obtidos foram que, das sub-bacias presentes na bacia hidrográfica do rio Goioerê, 0,0045% apresentaram um fator fragilidade entre 0 - 0.05; enquanto que 0,0003% abrangeram entre 0.05 - 0.2; e 0,0521% entre 0.2 - 0.6; e 29,6962% entre 0.8 - 1.0, por fim 70,2468% apresentaram um nível de fragilidade entre 0.6 - 0.8 (Figura 3), desse modo entende-se que quase toda bacia dispõe de uma baixa susceptibilidade a processos erosivos, tendendo à um menor risco de degradação da bacia hidrográfica do rio Goioerê.

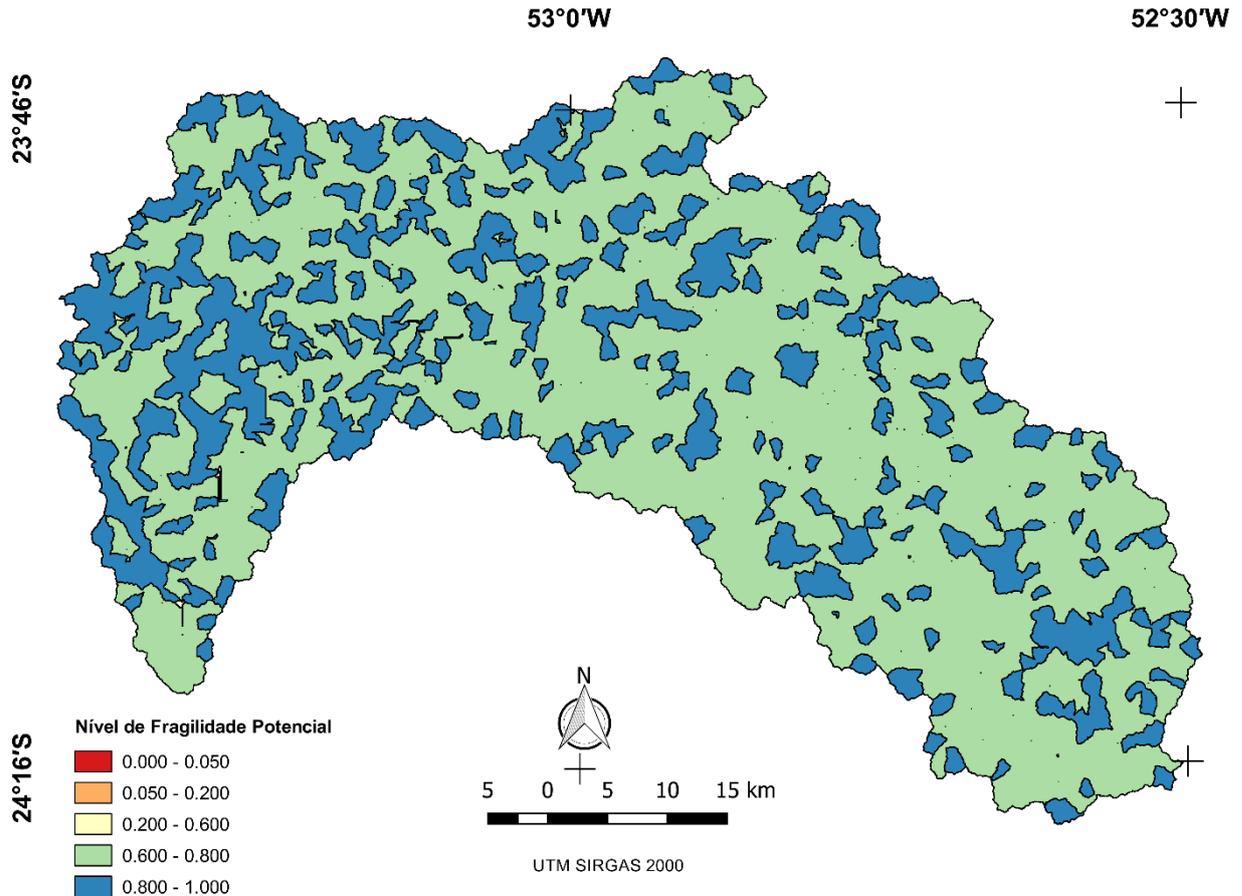


Figura 3 - Nível de fragilidade potencial da bacia hidrográfica do rio Goioerê.
Fonte: Autoria própria.

4.3. Fator de Desenvolvimento Humano

Para determinação do fator de desenvolvimento humano foi-se necessário calcular as quatro dimensões propostas: educação, saneamento, longevidade e renda em relação a cada setores censitários, pois era a menor escala de dados que se dispunha para o cálculo.

A bacia hidrográfica do rio Goioerê possui 242 setores censitários definidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010), dos quais 2,89% pertence ao município de Alto Piquirí, 2,48% à Araruna, 2,48 à Boa Esperança, 1,24% à Campo Mourão, 0,83% à Cianorte, 11,98% à Cruzeiro do Oeste, 4,96% à Farol, 0,41% à Goioerê, 7,02% à Janiópolis, 2,07% à Mamborê, 2,89% à Mariluz, 5,79% à Moreira Sales, 1,24% à Perobal, 6,20% à Tapejara, 7,02% à Tuneiras do Oeste e 40,50% ao município de Umuarama (Veja na Figura 1 os municípios que fazem parte da bacia hidrográfica em estudo).

Os resultados obtidos através do cálculo do fator de desenvolvimento humano da bacia hidrográfica do rio Goioerê, foram: 0,002% dos setores censitários apresentaram um nível de entre 0 - 0.2, 1,94% corresponderam um nível entre 0.2 - 0.4, 50,87% um nível entre 0.4 - 0.6, 46,60% entre 0.6 - 0.8 e 0,56% dos setores censitário apresentaram nível de desenvolvimento humano entre 0.8 - 1.0 (Figura 4).

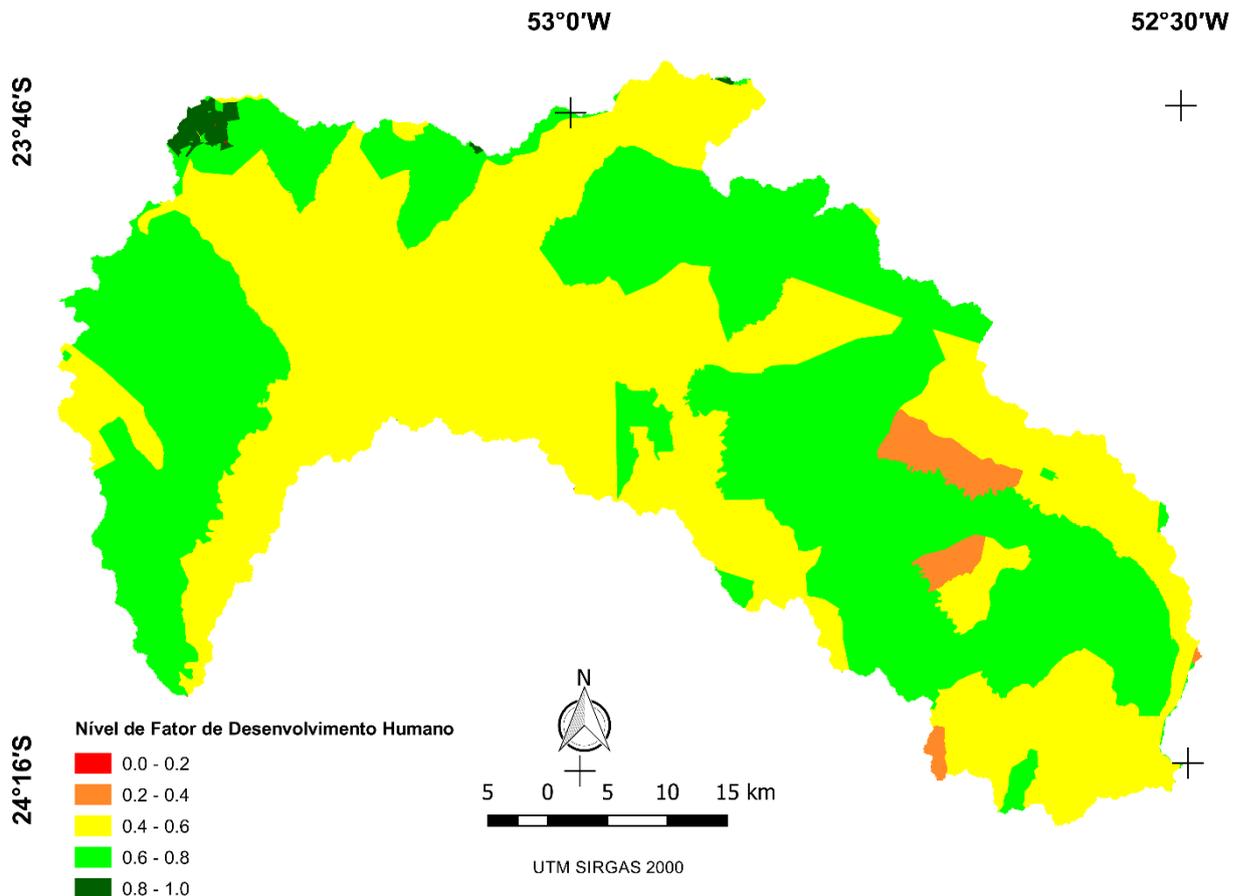


Figura 4 - Nível de fator de desenvolvimento humano da bacia hidrográfica do rio Goioerê.
Fonte: Autoria própria.

4.4. Índice de Sustentabilidade Ambiental

O cálculo do índice de sustentabilidade ambiental possibilitou identificar a variação do nível de sustentabilidade na extensão da bacia hidrográfica do rio Goioerê, sendo esses níveis distribuídos em cinco classes compondo-se em: muito baixo representando 0%, baixo correspondendo 0,0004%, médio equivalendo à 2,4604%, alto referindo-se à 87,1254% e muito alto sendo 10,4133% da área total da bacia (Figura 5).

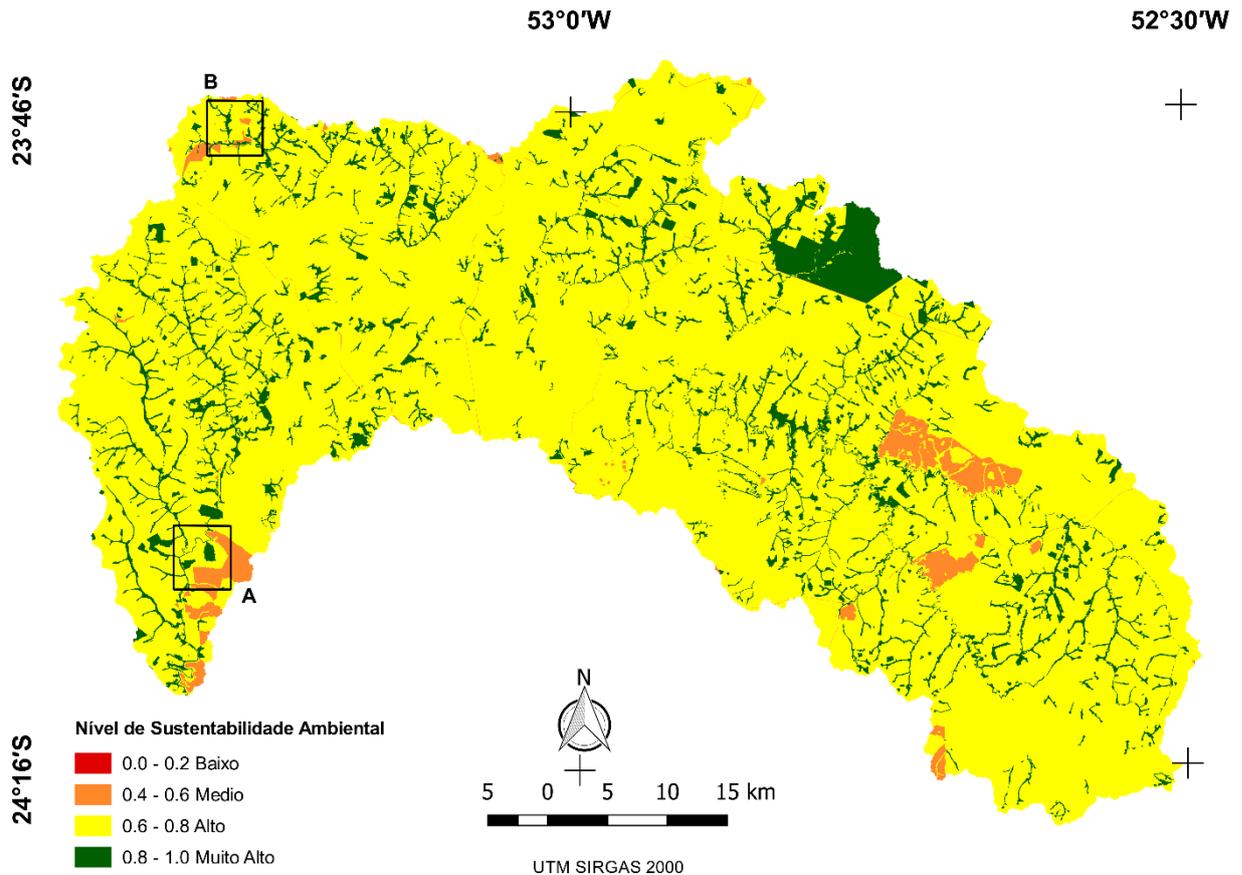


Figura 5 - Nível de sustentabilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Goioerê.
Fonte: Autoria própria.

Essa distribuição em níveis de sustentabilidade demonstrou que a bacia do rio Goioerê expressa uma predominância de alta sustentabilidade seguido de muito alta sustentabilidade em determinadas áreas características, evidenciadas pela disposição destes níveis ao longo de toda bacia hidrográfica.

5. DISCUSSÃO

Há uma influência notória do fator uso do solo na composição do índice de sustentabilidade. Em áreas onde há presença de vegetação nativa, a sustentabilidade ambiental apresentou nível muito mais alto do que em áreas com outros tipos de uso (Figura 2 e 5). Entretanto há uma predominância de áreas agrícolas na bacia hidrográfica do rio Goioerê, que pode ser explicada pela exploração agroindustrial dos recursos naturais aliados ao aumento da infraestrutura em áreas urbanas (TREVISAN e MOSCHINI 2015), sendo essas ações as principais responsáveis pela fragmentação e desmatamento das florestas (LAURANCE; VASCONCELOS; LOVEJOY, 2000; RIBEIRO et al., 2009).

A ausência da vegetação nativa em grande parte na bacia hidrográfica, representa áreas críticas, pois conforme Huang et al. (2013), as florestas possuem um papel importante de controle e regulação da qualidade da água, e Dechen et al. (2015) complementa que, além disso, diminuem o processo de erosão e lixiviação do solo para os cursos d'água. Nos resultados obtidos por Tan et al. (2015), é evidente que o ciclo hidrológico é influenciado pela variação do uso da terra, pois em áreas composta por agricultura foi concluído que aumentou-se drasticamente o escoamento superficial e que o fluxo de água subterrânea e a percolação diminuíram na bacia estudada; e Adan e Atkinson (2011) avaliaram o impacto do uso do solo na vazão da bacia em seu estudo, e concluíram que a enorme expansão agrícola contida na bacia teve impacto significativo no fluxo das correntes; estes impactos influenciam diretamente no processo de lixiviação e de assoreamento do corpo hídrico, degradando-o e por consequência reduzindo o índice de sustentabilidade das bacias.

Evidenciou-se ainda, a importância do fator fragilidade potencial no resultado do índice, pois praticamente toda bacia expressou baixo índice de rugosidade o que reflete em um bom resultado para a bacia em relação ao índice de fragilidade potencial, e ao ser analisado junto ao uso da terra, percebe-se que locais onde a bacia apresenta alto potencial erosivo é acompanhado à ausência vegetação nativa, e índice de sustentabilidade ambiental reduzida. Cardoso, et al. (2006) explicam que essa relação de inclinação da vertente com a vegetação intervém nos efeitos dinâmicos da encosta, ou seja, áreas em que apresentam altos índices de rugosidade com ausência vegetação são predispostas a provocar a erosão. Issaka e Asharaf (2017) descrevem que a erosão esta ligada a poluição de corpos d'água, zonas úmidas e a redução na

produtividade das terras agrícolas, ou seja, gerando degradação dos recursos naturais e assim influenciando diretamente no índice de sustentabilidade ambiental.

Além disso, constatou-se a relevância do fator de desenvolvimento humano em dispor quatro as dimensões analisadas - dimensões educação, saneamento, longevidade e renda – pois a variedade dos dados destas dimensões o afeta diretamente, dificultando alcançar um nível desejado de sustentabilidade ambiental, pois o fator depende do equilíbrio destas dimensões em níveis favoráveis.

Ao analisar o fator de desenvolvimento humano em relação às cinco faixas de desenvolvimento municipal proposto pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (2013), pode-se concluir que 97,47% da bacia hidrográfica do rio Goioerê está numa faixa de desenvolvimento entre baixo e muito baixo nível de desenvolvimento humano (entre 0.2 a 0.6).

A fim de atingir níveis satisfatórios de desenvolvimento no tema Educação, Batalhão e Teixeira (2013), descrevem que é necessário otimizar as atividades voltadas para essa dimensão de forma ampla e, portanto, devem ser objeto de preocupação do poder público

Já com a finalidade conquistar níveis adequados de desenvolvimento no tema Saneamento, é fundamental que os órgãos públicos visem a realização de serviços sanitários para população, pois de acordo com Braga (2006), serviços sanitários é um indicador de grande importância, pois ele atinge os objetivos de alcançar a segurança ambiental e prevenção de degradação, e ao fornecer água potável, conseqüentemente implica em redução de doença aumentando a qualidade de vida e que a falta do saneamento também é uma ameaça aos recursos hídricos.

Para atingir valores aceitáveis e sustentáveis no tema Longevidade, é necessário observar um conjunto de características constitutivas e a disponibilidade de serviços básicos de infraestrutura, saúde, saneamento, dentre outros. Esses fatores são determinantes para o bem-estar social de uma localidade ou região. A camada socioeconômica em que o indivíduo está inserido, o nível de instrução e a disposição de equipamentos de saúde (geograficamente) podem contribuir para a evolução do tema Longevidade. O acompanhamento da atenção básica nas localidades também exerce impacto positivo na saúde das pessoas, e conseqüentemente, na continuidade das atividades produtivas (BATALHÃO, et al., 2018).

Em relação a dimensão renda, este é analisado através do indicador renda *per capita* (em R\$). Batalhão, et al. (2018), dissertam que esse indicador auxilia no entendimento de padrões de consumo e produção, considerado um dos indicadores básicos para observar o comportamento de uma economia.

Para que o Brasil avance na direção da sustentabilidade (social, econômica e ambiental) os maiores investimentos deverão ser feitos nos setores de proteção, ampliação de áreas protegidas e saneamento (dimensão ambiental), distribuição de renda, condições de habitação e segurança (dimensão social), aumento do investimento e mudança nos padrões de consumo (dimensão econômica) e aumento dos gastos com pesquisa e desenvolvimento (dimensão institucional) (KRONENBERGER, et al., 2008).

Desse modo, é visível que a bacia hidrográfica do rio Goioerê carece de gestões que visam o desenvolvimento humano em relação aos aspectos da economia e da sociedade tendo como foco a gestão dos recursos hídricos.

A gestão dos recursos hídricos, assume grande importância no gerenciamento para atingir um desenvolvimento humano sustentável, já que existem múltiplos usos da água como: à produção de alimentos, às condições de saúde, à segurança do abastecimento doméstico de água, ao saneamento básico, que visam a sustentabilidade ambiental (CARR et al, 2012; AUGUSTO et al, 2012).

Ao correlacionar os três fatores que geram o índice de sustentabilidade em questão, percebe-se o quão importante esses fatores influenciam diretamente na sustentabilidade ambiental, por exemplo: em áreas de vegetação nativa, com bons indicativos do fator fragilidade potencial, e com alto e muito alto fator de desenvolvimento humano, evidencia-se um nível muito alto de sustentabilidade ambiental (Figura 6).

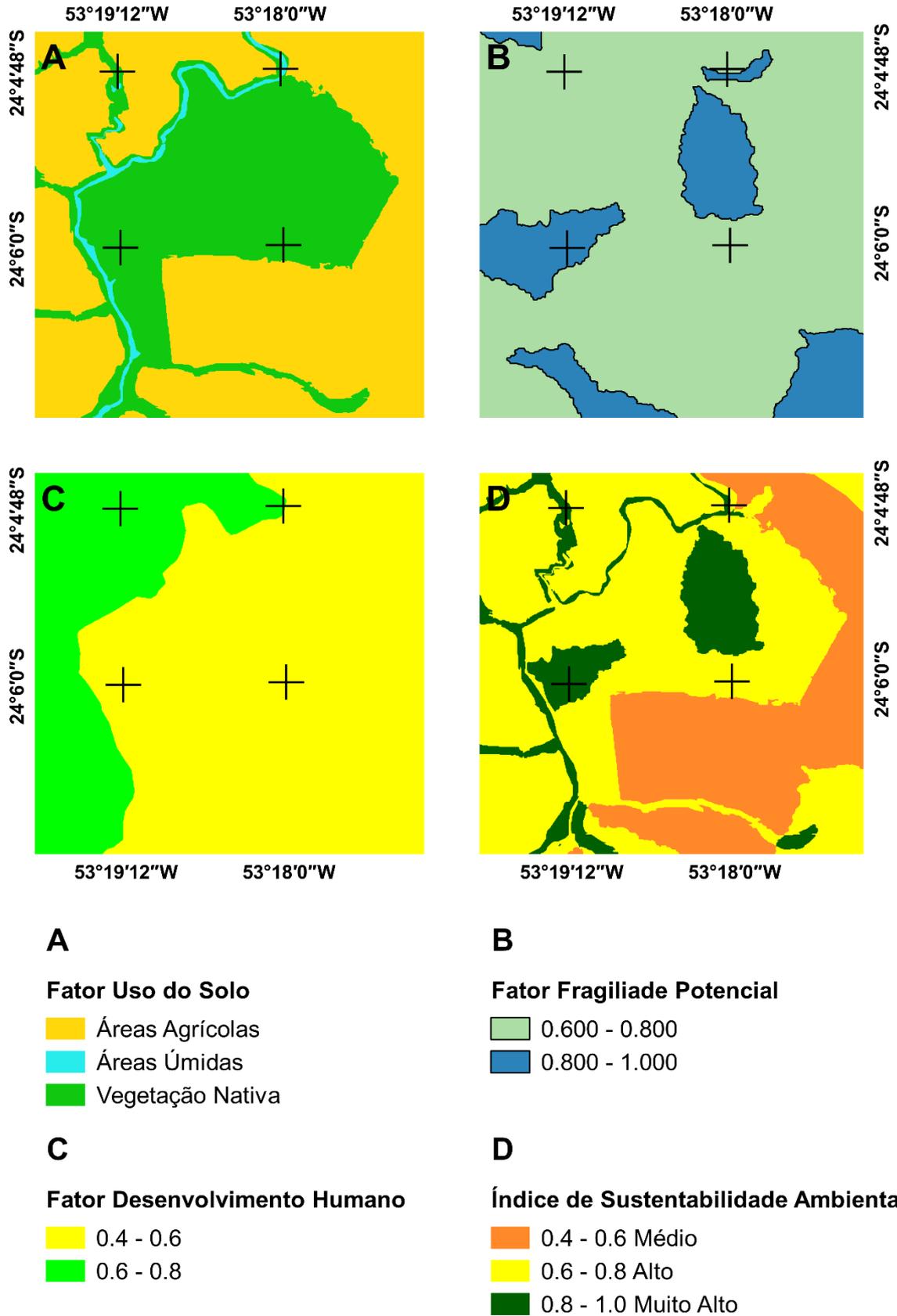
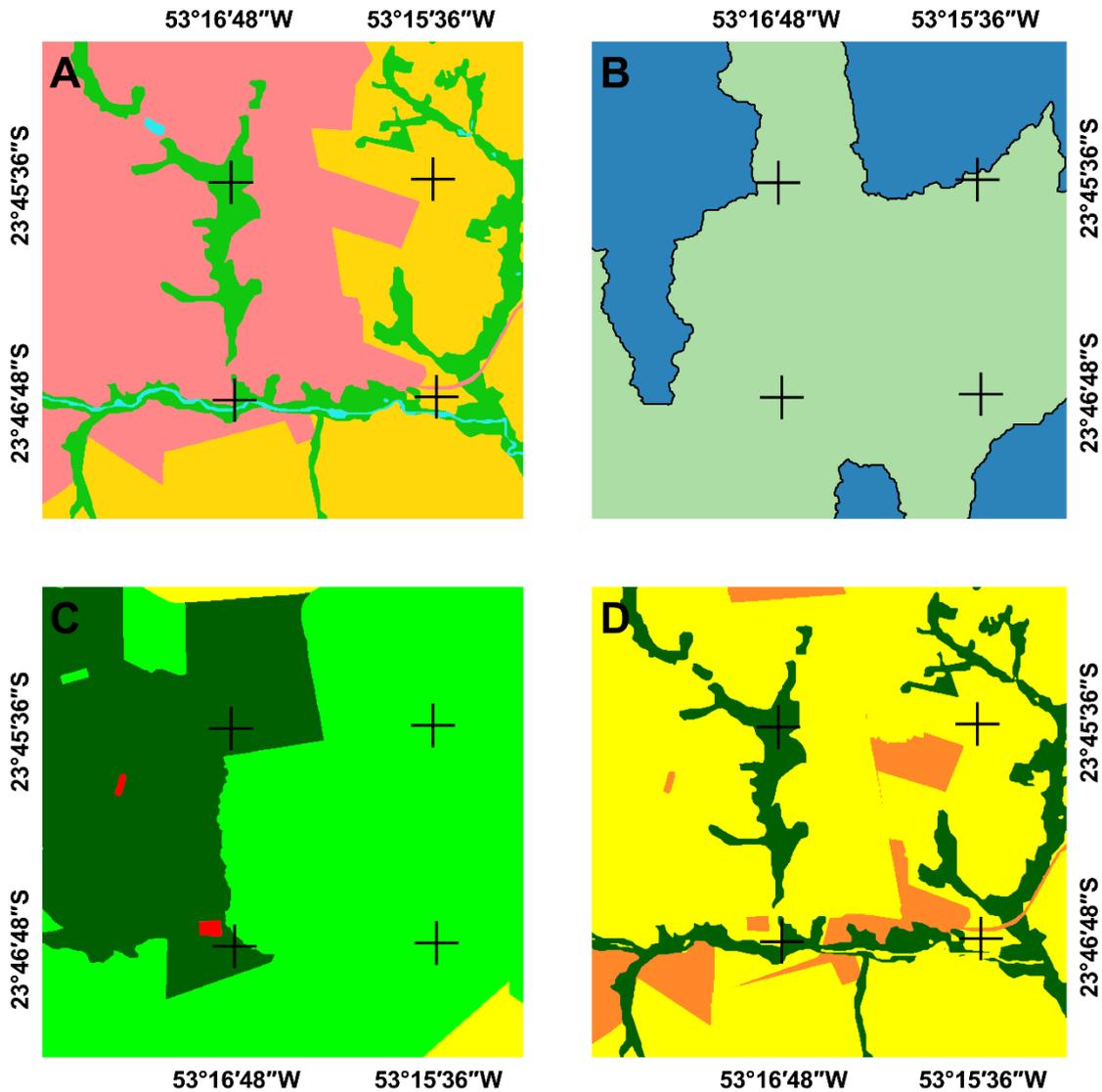


Figura 6 - Recortes dos dados obtidos. A) Resultado do fator do uso do solo. B) Resultado do fator fragiliade potencial. C) Resultado do fator de desenvolvimento humano. D) Resultado do índice de sustentabilidade ambiental (Veja a localização na Figura 5 – Quadrante A).

Fonte: autoria própria.

Também é observado que, em áreas onde a antropização é presente, e mesmo havendo presença de bons indicativos de fator fragilidade, junto com níveis baixos e muito baixos de desenvolvimento humano, propiciou níveis baixos de sustentabilidade ambiental, sendo evidente a influência do fator uso do solo e do fator de desenvolvimento humano no resultado da sustentabilidade ambiental (Figura 7).

**A****Fator Uso do Solo**

- Áreas Agrícolas
- Áreas Antropizadas Não Agrícolas
- Áreas Úmidas
- Vegetação Nativa

B**Fator Fragilidade Potencial**

- 0.600 - 0.800
- 0.800 - 1.000

C**Fator de Desenvolvimento Humano**

- 0.0 - 0.2
- 0.4 - 0.6
- 0.6 - 0.8
- 0.8 - 1.0

D**Índice de Sustentabilidade Ambiental**

- 0.4 - 0.6 Médio
- 0.6 - 0.8 Alto
- 0.8 - 1.0 Muito Alto

Figura 7 Recortes dos dados obtidos. A) Resultado do fator do uso do solo. B) Resultado do fator fragilidade potencial. C) Resultado do fator de desenvolvimento humano. D) Resultado do índice de sustentabilidade ambiental (Veja a localização na Figura 5 – Quadrante B).

Fonte: Autoria própria.

A bacia hidrográfica do rio Goioerê apresentou mais de 97% de predominância de alto e muito alto nível de sustentabilidade ambiental, certamente devido, ao uso e ocupação da terra, o predomínio de baixos e muitos baixos níveis de fator fragilidade e áreas específicas de bons indicadores de fator de desenvolvimento humano. Já no estudo realizado por Oliveira e Reis (2017), a bacia hidrográfica do Rio Pitumbu foi classificada no ano de 2000 como “conflito potencialmente crítico” e no ano de 2015 sua classificação foi agravada, classificada como “conflito crítico”, sendo justificada pelo fato de que houve um aumento no uso e ocupação da terra irregular das áreas de preservação permanente (APP).

Problemas no uso e ocupação da terra também são encontrados no estudo de Pellicer-Martínez e Martínez-Paz (2016), em que na bacia do rio Segura, no sudeste da Espanha, foi identificado que os corpos d’água são insustentáveis e que sofrem com a escassez de água e/ou poluição, devido a superexploração generalizada de aquíferos na bacia hidrográfica e a existência de áreas agrícolas na região, apresentando insustentabilidade ambiental na bacia. Isso reflete o quanto o uso e ocupação da terra influencia no resultado da sustentabilidade ambiental das bacias hidrográficas.

Um índice de sustentabilidade ambiental para bacias hidrográficas deve permitir avaliar se em toda sua extensão, esta em uma trajetória de crescimento sustentável. Hák et al. (2017) descrevem que é difícil avaliar o impacto que índices e indicadores exercem no progresso da sustentabilidade ambiental afim de ser suficiente para produzir mudanças nas decisões públicas para atingir um desenvolvimento sustentável. Porém, Dahl (2012), relata que índices e indicadores possuem um efeito significativo, pois tornam visíveis os problemas encontrados no estudo em questão afim de sensibilizar as decisões políticas.

6 CONCLUSÃO

A bacia hidrográfica do rio Goioerê demonstrou mais de 87% de nível alto no índice de sustentabilidade ambiental, e que o fator de uso do solo, fator de fragilidade potencial e fator de desenvolvimento humano, são dimensões essenciais para analisar a sustentabilidade ambiental para bacias hidrográficas, já que estes analisam os fatores ambiental, econômico e social.

No entanto, deve-se atentar que, aproximadamente 16% do uso e ocupação da terra, na bacia hidrográfica, é vegetação nativa, e que esse valor é possível ser ampliado, inserindo mais áreas verdes nas áreas antropizadas e acrescentando vegetação ripária na bacia, já que mais de 80% desta é ocupada por áreas agrícolas. Já em relação a fragilidade potencial, a bacia hidrográfica apresenta bons indicativos, o que representa baixa susceptibilidade a processos erosivos e conseqüentemente baixa degradação dos recursos naturais. Entretanto, ao analisar o fator de desenvolvimento humano, percebe-se que ainda há grande necessidade de investimentos públicos neste fator, pois a bacia apresenta mais de 97% de níveis baixos de desenvolvimento humano ao considerar as quatro dimensões propostas no estudo.

A determinação geoestatística do índice de sustentabilidade ambiental para bacias hidrográficas utilizando ferramentas de geoprocessamento e sensoriamento remoto expressou resultados consistentes, sendo capaz de ser aplicado em diversos escalas de bacias hidrográficas em qualquer região do mundo, pois além de apresentar baixos custo para elaboração do índice, os dados que o complementam são públicos e acessíveis financeiramente, o que colabora para realizar sua aplicação, contribuindo tanto para conhecimento técnico-científico, quanto para o planejamento e gestão nas políticas públicas afim de alcançar a sustentabilidade ambiental para todos da sociedade.

Portanto, sensibilizar o poder público quanto à índices e indicadores, fará com que estes gerenciem melhor suas ações para sustentabilizar seus recursos naturais e para que também tenham ganhos econômicos e índice de sustentabilidade ambiental para bacias hidrográficas proposto neste estudo adapta-se a qualquer bacia hidrográfica em escala mundial, sendo possível também adicionar outros indicadores afim de identificar áreas que necessitam de uma atenção maior do poder público, tanto nas dimensões ambientais, econômicas e sociais.

O índice de sustentabilidade ambiental resultante neste trabalho, possibilita também realizar estudos futuros, na área ambiental, econômica ou social, afim de identificar quais são as causas do baixo nível de sustentabilidade ambiental na bacia hidrográfica do rio Goioerê e assim executar ou propor tais melhorias para estes fatores.

REFERÊNCIAS

- ADNAN, N. A.; ATKINSON, P. M. Exploring the impact of climate and land use changes on streamflow trends in a mon-soon catchment. **International Journal of Climatology**. v. 31, p. 815-831, 2011.
- AUGUSTO, L.G.; GURGEL, I. G. D.; NETO, H. F. C.; MELO, C. H.; COSTA, A. M. O contexto global e nacional frente aos desafios do acesso adequado à água para consumo humano. **Ciência & saúde coletiva**; 17(6): 1511-1522, 2012.
- BATALHÃO, A. C. S.; TEIXEIRA, D. Indicadores de Sustentabilidade para a Educação: uma análise do tema Conhecimento e Cultura a partir do Barômetro da Sustentabilidade em Ribeirão Preto (SP). In: ESPIRITO SANTO, P. S. M. F.; BANDOS, M. F. C. (Org.). **Políticas públicas e desenvolvimento**. Franca, SP: Editora Uni- Facef, p. 1-23, 2013.
- BÖHRINGER, C., JOCHEM, P.E. Measuring the immeasurable—a survey of sustainability indices. **Ecological Economics**. v. 63 n.1. p. 1–8, 2007.
- BRAGA, T. M.; FREITAS, A. P.; DUARTE, G. S. SOUSA. J. C. Índices de sustentabilidade municipal: o desafio de mensurar. **Nova Economia**. Belo Horizonte. Set. - dez. 2004, p.11-33.
- BRAGA, T. Sustentabilidade e condições de vida em áreas urbanas: medidas e determinantes nas Regiões Metropolitanas de São Paulo e Belo Horizonte. **Revista Latinoamericana de Estudios Urbano Regionales (EURE)**, v. 32, n. 96, p. 47-71, 2006.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. C. P. SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS with Object-Oriented Data Modelling. **Computers and Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, May-Jun 1996.
- CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, S. V. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 241-248, 2006.
- CARR, G.; BLÖSCHL, G.; LOUCKS, D. P. Evaluating participation in water resource management: A review. **Water Resources Research**; 48, 2012.
- CHAVES, H.M.L.; ALIPAZ, S. An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life, and policy: The watershed sustainability index. **Water Resources Management** 21(5), 883 – 895, 2007.
- CHILDERS, D. L.; CADENASSO, M. L.; GROVE, J. M.; MARSHALL, V.; MCGRATH, B.; PICKETT, S. T. A. An ecology for cities: A transformational nexus of design and ecology to advance climate change resilience and urban sustainability. **Sustainability** 7: 3774–3791, 2015.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, p. 188, 1980.

COUTO, O. F. V. **Geração de um índice de sustentabilidade ambiental para Bacias Hidrográficas em áreas urbanas através do emprego de técnicas integradas de geoprocessamento**. 2007. 172 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
DAHL, A.L. Achievements and gaps in indicators for sustainability. **Ecological Indicators**. v.17, p. 14–19, 2012.

DECHEN, S. C. F.; TELLES, T. S.; GUIMARAES, M. F.; MARIA, I. C. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. **Bragantia**, São Paulo, v. 74, n. 2, p. 224-233, 2015.

DIZDAROGLU, D. The Role of Indicator-Based Sustainability Assessment in Policy and the Decision-Making. Process: A Review and Outlook. **Sustainability**. v. 9, n.6, p. 5512-5534, 2017.

DU PISANI, J.A. Sustainable development – historical roots of the concept. **Environmental Sciences**, v. 3 n. 2, pp. 83-96, 2006.

EQUIPE DE DESENVOLVIMENTO QGIS. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation, 2016.

FRANZITTA, V.; CURTO, D.; RAO, D. Energetic Sustainability Using Renewable Energies in the Mediterranean Sea. **Sustainability**. v. 8, n. 11, p. 1164, 2016.

GAN, X.; FERNANDEZ, I.C.; GUO, J.; WILSON, M.; ZHAO, Y.; ZHOU, B.; WU, J. When to use what: methods for weighting and aggregating sustainability indicators. **Ecological Indicators**, v. 81, p. 491-502, 2017.

HÁK, T., JANOUŠKOVÁ, S., MOLDAN, B. DAHL, A. L. Closing the sustainability gap 30 years after “Our Common Future”, society lacks meaningful stories and relevant indicators to make the right decisions and build public support. **Ecological Indicators**. v. 60, p. 565–573, 2017.

HÁK, T., JANOUŠKOVÁ, S., MOLDAN, B., 2016. Sustainable development goals: a need for relevant indicators. **Ecological Indicators**. v. 60, p. 565–573, 2016.

HUANG, J.; ZHAN, J.; YAN, H.; WU, F.; DENG, X. Evaluation of the Impacts of Land Use on Water Quality: A Case Study in The Chaohu Lake Basin. **The Scientific World Journal**. p. 1-7, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010**: Resultados do Universo. IBGE, 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/default.shtm>>. Acesso em: 25 set. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Geociências**: Bases cartográficas contínuas. 2014. Disponível em:

<http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 25 set. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Manuais**: Introdução ao geoprocessamento. Divisão de Processamento de Imagens. 2006b. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_geo.html>. Acesso em: 26 jan. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **TerraView Hidro versão 4.2.2**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: 2006a.

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - IPARDES, 2017. Disponível em:<<http://www.ipardes.gov.br/>>. Acesso em: 30 mai. 2018.

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE AND NATURAL RESOURCES - IUCN. **World Conservation Strategy: Living Resource Conservation for Sustainable Development**. Gland, Switzerland:, 1980.

ISSAKA, S.; ASHARAF, M. A. Impact of soil erosion and degradation on water quality: a review. **Geology, Ecology, and Landscapes**, vol. 1, p. 1-11, 2017.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY (JAXA). Earth Observation Research Center. ALOS user handbook. NDX-070015. 2007. 146 p. Disponível em:<<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/handbk.htm>>. Acesso em 24 de nov. 2017.

KATES, R., CLARK, W.C., HALL, J.M., JAEGER, C., LOWE, I., MCCARTHY, J.J., SCHELLNHUBER, H.J., BOLIN, B., DICKSON, N.M., FAUCHEUX, S. Sustainability science. **Science**. p. 641–642, 2001.

KEMERICH, P. D. C.; MARTINS, S. R.; KOBAYAMA, M.; BURIOL, G. A.; BORBA, W. F.; RITTER, L. G. Avaliação da Sustentabilidade Ambiental em Bacias Hidrográficas mediante a aplicação do modelo P-E-R. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 10, n. 10, p. 2140-2150, jan/abr. 2013.

KRONEMBERGER, D. M. P.; JUNIOR, J. C.; NASCIMENTO, J. A. S.; COLLARES, J. E. R.; SILVA, L. C. D. Desenvolvimento Sustentável no Brasil: uma análise a partir da aplicação do Barômetro da Sustentabilidade. **Sociedade & Natureza**, v. 20, n. 1, p. 25-50, 2008.

LARA, L. G. A.; OLIVEIRA, S. A. A ideologia do crescimento econômico e o discurso empresarial do desenvolvimento sustentável. **Cadernos EBAPE.BR**, v.15, n.2, p.326-348, 2017.

LAURANCE, W. F.; VASCONCELOS, H. L.; LOVEJOY, T. E. Forest loss and fragmentation in the Amazon. **Oryx**, [s.l.], v. 34, n. 1, p. 39–45, 2000.

LEIGH, M.; Li, X. Industrial ecology, industrial symbiosis and supply chain environmental sustainability: a case study of a large UK distributor. **Journal of Clean. Production**. 106, 632 e 643, 2015.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. 3ª Edição, Porto Alegre: Bookman, 2013. 540p.

MAYNARD, I. F. N.; CRUZ, M. A. S.; GOMES, L. J. Applying a Sustainability Index to the Japarutaba River Watershed in Sergipe State. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, Sp, v. 20, n. 2, p.201-220, jun. 2017.

MELTON, M. A. An analysis of the among elements of climate, surface properties and geomorphology. **Technical Report** (11). Columbia University, Dept. Geology , 1957.

MIRANDA, M. P.; PONTES, M. P.; MORAIS, P. Â. S. M.; UCHOA, E. B.; DUARTE, C. R.; SOUTO, M. V. S. Emprego de Técnicas de Processamento Digital em Imagens Landsat 8 para Mapeamento Geológico. **Revista de Geologia**, Fortaleza - Ce, v. 29, n. 1, p.31-80, mai., 2016.

NYERGES, T. Linked visualizations in sustainability modeling: an approach using participatory GIS for decision support. **Association of American Geographers Illustrated**, Los Angeles, CA, p 18. 2002.

OLIVEIRA, V. M. M.; REIS, L.M. M. Conflitos em áreas de preservação permanente na bacia hidrográfica do Rio Pitimbu-RN: proposta de um indicador institucional de sustentabilidade. **Guaju, Revista Brasileira de Desenvolvimento territorial sustentável**. v. 3, n1, p. 91-119, 2017.

ÖZDEMİR, E. D.; HÄRDITLEIN, M.; JENSSEN, T.; ZECH, D.; ELTROP, L. A confusion of tongues or the art of aggregating indicators — reflections on four projective methodologies on sustainability measurement. **Renewable Sustainable Energy Reviews**; v. 15, p. 2385–2396, 2011.

PELLICER-MARTÍNEZ, F., MARTÍNEZ-PAZ, J.M., 2016. The Water Footprint as an indicator of environmental sustainability in water use at the river basin level. **Science. Total Environment**. v. 571, p. 561–574, 2016.

PETERSON, G. N. **GIS Cartography: a Guide do Effective Map Design**. New York: Taylor & Francis Group.p.215, 2009.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil 2013**: O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal Brasileiro. Brasília: PNUD/IPEA/FJP, 2013. Disponível em: <<http://www.atlasbrasil.org.br/2013/pt/consulta/>>. Acesso em: 25 set. 2017.

RAUBER, D.; FUGII, G. M.; NASCIMENTO, D. E.; SILVA, C. L. Indicadores da Gestão dos Resíduos Sólidos d Saneamento Básico Presentes No Plano Municipal De Saúde De Curitiba 2014-2017. In: 8º Fórum Internacionais De Resíduos Sólidos, 8., 2017, Curitiba, Pr. **Anais...** Curitiba: Instituto Venturi, 2017. p. 1 - 10.

- RIBEIRO, L. L.; LIMA, J. D. Análise dos Possíveis Impactos Relacionado ao Uso da Terra: Avaliação com a Aplicação do Geoprocessamento na Bacia Hidrográfica do Rio Veríssimo. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, [s. L.], v. 02, n. 1, p.61-73, 2014. Trimestral.
- RIBEIRO, Loren Lucas; LIMA, João Donizete. Análise dos Possíveis Impactos Relacionado ao Uso da Terra: Avaliação com a Aplicação do Geoprocessamento na Bacia Hidrográfica do Rio Veríssimo. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, [s. L.], v. 02, n. 1, p.61-73, 2014. Trimestral.
- RIBEIRO, M. C.; METZGER, J. P.; MARTENSEN, A. C.; PONZONI, F. J.; HIROTA, M. M. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, [s.l.], v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 2009.
- SACHS, J.D. **The Age of Sustainable Development**. Columbia University Press, New York, 2015.
- SCOTT, L, JANIKAS M. Spatial statistics in ArcGIS. **Handbook of Applied Spatial Analysis**. Fischer MM, Getis A. eds., London, UK: Springer, p.27–41, 2017.
- SILVA, D. C. C.; FILHO, J. L. A.; OLIVEIRA, R. A. ; LOURENÇO, R. W. Metodologia para análise do potencial de degradação dos recursos hídricos em bacias hidrográficas. **Caderno de Geografia**, v. 27, n.50, 2017.
- SILVA, L.; LIMA, E. R. V. Índice de Sustentabilidade da Dimensão Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú, CE. Espaço Aberto, **Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia - UFRJ** v. 7, n. 1, p. 71-85, 2017.
- STRAHLER, Arthur N. Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion al topography. **Geological Society America Bulletin**, 63(10):1117-1142, 1952.
- TAN, M. L.; IBRAHIM, A. L.; YUSOP, Z.; DUAN, Z.; LING, L. Impacts of land-use and climate variability on hydrological componentes in the Johor River basin, Malaysia. **Hydrological Sciences Journal**. v. 60, n. 5, p. 873-889, 2015.
- TODOROV, V.; MARINOVA, D. Modeling sustainability. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 1, n. 7, p. 1397-408, 2011.
- TREVISAN, D. P.; MOSCHINI, L. E. Dinâmica de Uso e Cobertura da Terra em Paisagem no Interior de São Paulo: Subsídios para o planejamento. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 4, p. 16-30, 2015.
- TURNHOUT, E.; HISSCHEMOLLER, M.; EJSACKERS, H. Ecological indicators: between the two fires of science and policy. **Ecological Indicators**. v. 7, p. 215–228, 2007.
- UNITED NATIONS. Road Map towards the implementation of the United Nations Millennium Declaration - **Report of the Secretary-General**. Fifty-sixth session. 2001.

Disponível em:

<<http://www.un.org/millenniumgoals/sgreport2001.pdf?OpenElement>>. Acesso em 03 de fevereiro de 2018.

VIEIRA, P. M. S.; STUDART, T. M. C. Proposta Metodológica para o Desenvolvimento de um Índice de Sustentabilidade Hidro-Ambiental de Áreas Serranas no Semiárido Brasileiro - Estudo de Caso: Maciço de Baturité, Ceará. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 14, nº4 out./dez., p. 125-136, 2009.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our Common Future**. Oxford University Press, Oxford, 1987.

APÊNDICE A – Algoritmo do Índice de Sustentabilidade Ambiental.

```

LEGAL
Programa LEGAL  Editar  Executar

1  {
2  // Pesos a ser aplicados
3  // CAT_IDH = 0.000
4  // CAT_IR_2 = 0.000
5  // CAT_USO = 0.000
6
7  // Razao de consistência
8  // CR = 0.000
9
10 // Programa em LEGAL
11 // Este programa deve ser completado
12 // pelo usuario para incluir os dados
13 // apresentados entre os sinais de <>
14
15 // Definicao dos dados de entrada
16
17 Numerico  var1  ("CAT_IDH");
18 Tematico  var2  ("CAT_IR_2");
19 Tematico  var3  ("CAT_USO");
20
21 Tabela tab2  (Ponderacao);
22 tab2 = Novo (CategoriaIni = "CAT_IR_2" ,
23             "Mtfrac":1,
24             "frac":0.8,
25             "medio":0.6,
26             "forte":0.4,
27             "muitoforte":0.2);
28
29 Tabela tab3  (Ponderacao);
30 tab3 = Novo (CategoriaIni = "CAT_USO" ,
31             "AreaAgricola":0.5,
32             "VegetacaoNativa":1,
33             "Silvicultura":0.65,
34             "AreaAntropizadaNaoAgricola":0.25,
35             "AreasUmidas":0.875);
36
37 // Definicao do dado de saida
38
39 Numerico  var4  ("CAT_MNT");
40
41 // Recuperacao dos dados de entrada
42
43 var1 = Recupere (Nome="IDH_10k_Alos_Gm");
44 var2 = Recupere (Nome="IR");
45 var3 = Recupere (Nome="Uso_S2_ALOS_GM");
46
47 // Criacao do dado de saida
48
49 var4 = Novo (Nome="IS_Bacia_Goioere_V3", ResX=10, ResY=10, Escala=10000,
50             Min=0, Max=1);
51
52 // Geracao da media ponderada
53
54 var4 = ((var1/10000) + (Pondere(var2, tab2))+ (Pondere(var3, tab3)))/3;
55 }

```